

# 光沢金属面の三次元形状計測

山本昌治<sup>\*1</sup>、依田康宏<sup>\*1</sup>

## 3-Dimensional Shape Measurement of Glossy Metal Surfaces

Masaharu YAMAMOTO<sup>\*1</sup> and Yasuhiro YODA<sup>\*1</sup>

Research and Development Division, AITEC<sup>\*1</sup>

アクティブステレオ方式の三次元形状計測装置を試作し、カメラの露出を変えて撮影する手法と複数のカメラで撮影する手法により、光沢金属面の三次元形状計測を行った。2乗平均平方根粗さ $0.13\sim 0.26\mu\text{m}$ の曲面(寸法 $550\times 300\times 82\text{mm}$ )を計測した結果、98%の領域を測定精度 $1\text{mmRMS}$ で計測することができた。

また、複数カメラ配置を検討するために、金型などの光沢金属面の反射特性を調べ、独自の反射モデルを作成し、光線追跡シミュレータを試作した結果、Phongモデルよりも反射強度分布を正確に計算することができた。

### 1. はじめに

アクティブステレオ法<sup>1)</sup>による三次元形状計測法は、高速、高精度に三次元形状計測が可能であるが、計測対象物が光学的に拡散面であることを前提としている。産業分野では、光沢のある金属面が計測対象であることが多く、光学部品を始め超精密部品など完全な鏡面は、その特性を活かした種々の形状計測法<sup>2)</sup>が発表されている。一方、金型など高精度に機械加工された金属面は曲面形状のものも多く、曲面全体のデータを計測するにはアクティブステレオ法が有効である。だが、その表面は鏡面状態ではないが正反射光に比べ拡散反射光が極めて小さいので、拡散面を対象とした形状計測装置では計測困難な対象物である。現状では、計測面に予め白色粉末を塗布し表面を拡散反射の状態にして計測が行われている。

しかし、クリーンな環境を要求される製造・検査工程では、微粉末を塗布することはできない。また、塗布作業や清掃作業は作業効率が悪く、更に、均一な塗布は難しく計測精度を低下させる要因ともなっている。そのため、光沢金属面を直接計測可能な新しい計測方法の開発が望まれている。

本研究では、液晶プロジェクタとカメラを用いたアクティブステレオ方式の三次元形状計測装置を試作し、測定対象へ投影したパターン光を露出を変えて撮影する手法と、複数カメラを配置して撮影した点群データを合成する手法により、光沢金属面の直接計測を試みた。

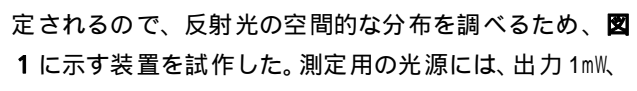
カメラ配置を検討するに当たり、プロジェクタから測定対象へ投影した光がカメラへ到達する過程をシミュ

レーションし、1つのカメラが計測可能な領域を推定できるソフトウェアが必要となる。そこで、プロジェクタから測定対象で反射してカメラへ到達する光線のシミュレータを試作し、カメラ配置が計算可能か検討した。また、シミュレータ試作の過程で光沢金属面の反射モデルが必要となるので、計測対象とした金型などの光沢金属面の反射特性を調べ、光沢金属面を対象とする光学反射モデルも提案した。

### 2. 実験方法

#### 2.1 光沢金属面の反射特性の測定

##### 2.1.1 反射特性測定装置

測定対象面には鏡面に近い正反射光があることと、機械加工時の工具移動方向に起因する反射特性の偏りが想定されるので、反射光の空間的な分布を調べるため、1に示す装置を試作した。測定用の光源には、出力 $1\text{mW}$ 、スポット径 $3\text{mm}$ の平行ビーム赤色半導体レーザーを使用した。測定面で反射されたレーザー光は散乱板に当たって散乱しデジタルカメラに到達する。散乱板には正反射光方向から $\pm 30$ 度以内の方向の反射光が当たり、デジタルカメラで観測することができる。

デジタルカメラの入射光量と画素値の関係は、白熱光源により散乱面を照明し明るさを変えながら、散乱面の照度を照度計で計測すると同時にデジタルカメラで撮影して求めた。露出時間を固定して撮影した場合の測定可能な照度の最大・最小比は25程度であり、正反射光成分と散乱光成分を同時に測定するには十分でない。そこで、

<sup>\*1</sup>基盤技術部

露出時間を 10 秒から 0.001 秒まで 10 倍間隔で変えて複数回撮影した画像を合成することにより、大きなダイナミックレンジを確保した。

### 2.1.2 測定方法

反射特性の測定は、表 1 に示す試料を清浄な状態と潤滑油が付着した状態（粘度グレード VG68 の潤滑油を滴下した後、垂直姿勢で 10 分間放置）で、上記反射特性測定装置により行った。

表 1 反射特性測定試料

試料名	材料	加工状態	表面粗さ ( $\mu\text{m}$ ) *1	
			最大高さ (粗さ) Rz	2 乗平均平方根 (粗さ) Rq
切削面	FCD60	10 ボールエンドミル	2.7 ~ 4.2	0.2 ~ 0.4
ラップ面	NAK80	ボールエンドミル切削後	3.3 ~ 6.0	0.6 ~ 1.0
研削面	S55C	WA46H 切込み 5 $\mu\text{m}$	0.9 ~ 2.7	0.13 ~ 0.28

\*1:表面粗さは、加工方向と直交する方向の値を示す。

## 2.2 光線追跡シミュレーションのアルゴリズム

光沢金属面の三次元形状データとプロジェクタの位置、及び反射モデルからカメラの配置位置と必要カメラ台数を確認するための光線追跡シミュレーションプログラムを作成した。形状データは STL 形式のデータにより入力する。プロジェクタは、距離による減衰のない点光源とし、点光源の位置、光源の強度を入力する。カメラは画角、値、位置及び向きを入力する。

今回行った光線追跡シミュレーションは、一般的なレイトレーシングプログラム<sup>3)</sup>と同様、カメラの各画素の中心を始点として、光線とは逆向きの視線方向のレイを考える。レイは形状データと交差した場合は、反射モデルに従って反射を繰り返す。レイが光源に向かう場合、又は背景に向かう場合は計算終了として、各画素での光の強度を計算し、カメラの値を考慮してカメラ上の各画素での輝度に変換する。

計算したカメラ上の輝度から計測対象面での反射強度の分布が分かり、カメラの配置が適切か確認できる。このシミュレーションを、カメラの配置を変更して対象面全体が計測できるまで繰り返し、必要カメラ台数を確認した。

## 2.3 光沢金属面の三次元形状計測

### 2.3.1 計測システム

光沢金属面の三次元形状を計測するために、主カメラ（サイズ 1024 × 768 の IEEE1394 カメラ）2 台及び LAN で接続された 4 台のパソコンを介した 24 台の補助カメラ（サイズ 640 × 480 の USB 接続カメラ）により同時に撮影するシステムを試作した（図 2）、プロジェクタからパ

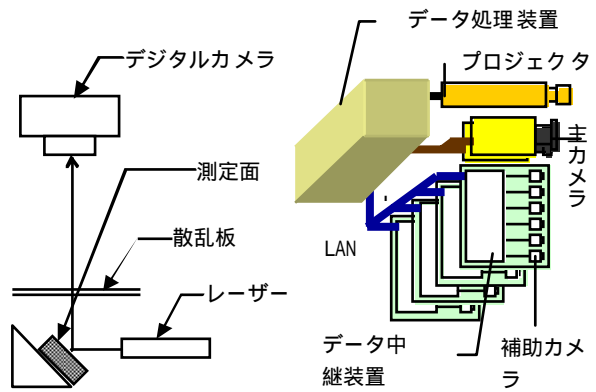


図 1 反射特性測定装置 図 2 システム構成

ターン光を投影し、順次各カメラのデータを保存した。

### 2.3.2 キャリブレーション方法

キャリブレーションは、昨年度と同様の方法<sup>4)</sup>を用いた。カメラのキャリブレーションは、各カメラごとに基準物体を用いた。プロジェクタのキャリブレーションは、プロジェクタから基準物体にパターン光を投影し、主カメラの 1 台を利用して行った。

### 2.3.3 三次元形状計測方法

主カメラについては、露出時間を変更する機能があるため、露出を変えて撮影した画像のうち、測定できた領域（カメラの各画素単位）を採用して合成することにより、ダイナミックレンジを大きくして三次元計測するプログラムを開発した。また、複数の観測点のカメラで計測した三次元点群データは、全てのデータを足して合成する方法により、光沢金属面全体のデータとした。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 光沢金属面の反射特性

#### 3.1.1 偏角反射特性

各金属加工面の反射特性の測定結果を図 3 に示す。放

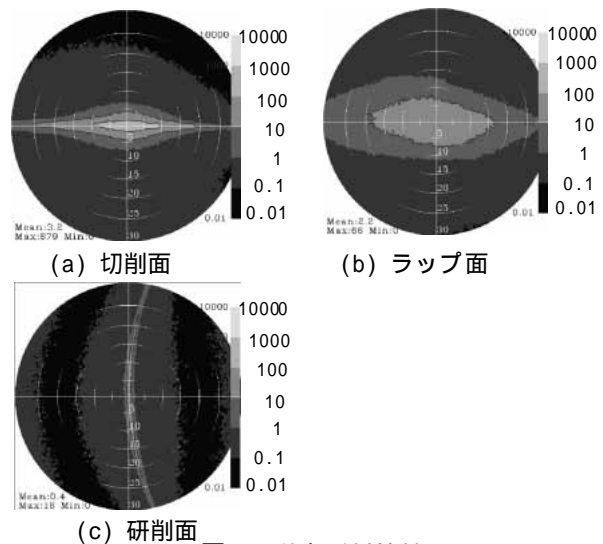


図 3 偏角反射特性

射輝度を示す表示色は、同時に計測した白色拡散面の平均放射輝度を基準とした対数比を示し、等高線は10倍ごとに表示している。グラフの中央は正反射状態となる反射角度で、最大外周円は正反射角度から30度ずれた反射角度を示す。

機能的な表面粗さが同じ金型においても加工方法により光学的な特性（加工方向による偏りなど）は大きく異なる。また、潤滑油が塗布された状態はばらつきが大きく、シミュレーションが難しい。

### 3.1.2 反射モデル

金型などの金属加工面は、機械加工に起因する規則性の高い微細な起伏と材料特性や汚れなどに起因するランダムな起伏が存在し、CGの分野で使用されている Phong<sup>5)</sup> や Torrance-Sparrow<sup>6)</sup> の光学反射モデルが当てはまらないことが分かった。鏡面反射成分には、正反射方向の強い成分 (Specular Spike) と正反射方向の広がった成分 (Specular Lobe) のあることが報告されている<sup>7)</sup>。そこで、上記モデルの鏡面反射成分を2パラメータに拡張した独自反射モデルを考案し、金属面から反射する光線のシミュレーション精度を高めた。なお、Torrance-Sparrow と Phong はほぼ同様の結果であったため、今回は Phong モデルを拡張した式を以下に示す。

(拡張 Phong モデル)

$$I = (kd \cdot \cos^2 \theta + ks1 \cdot \cos^{n1} \theta + ks2 \cdot \cos^{n2} \theta) \cdot I_i \dots (1)$$

kd: 拡散反射率、 $\theta$ : 入射角、ks1, ks2: 鏡面反射率、n1, n2: 反射特性係数、

$\theta$ : 正反射方向と視線とのなす角、

$I_i$ : 入射光強度、I: 反射光強度

図4は自動車外板の反射特性の測定結果と、(1)式にフィットした結果のグラフ図であり、鏡面反射成分が1パラメータの Phong モデルよりも、拡張 Phong モデルの方がより実物に近くフィットできていることが分かる。また、表1の試料の測定結果に、(1)式をフィットしてパラメータを求めた結果が表2である。

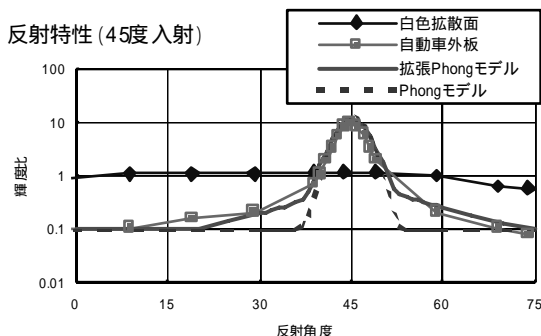


図4 反射特性

表2 拡張 Phong 反射モデルのパラメータ

	ks1	n1	ks2	n2	kd
切削面	160	3000	7	200	0.01
ラップ面	130	1500	20	100	0.2
研削面	12	1500	1.5	60	0.1

### 3.2 光線追跡シミュレーション

自動車外板に対して図4からパラメータを算出し、光線追跡シミュレーションを行った。図5は(a)パラメータ(ks1, n1, kd)を用いたもの、(b)パラメータ(ks2, n2, kd)を用いたもの、(c)両方(ks1, n1, ks2, n2, kd)を用いたもの、(d)実物写真を示している。2パラメータのモデルを加算することにより、拡張 Phong モデルが現実の写真に近くシミュレーションできていることが分かる。

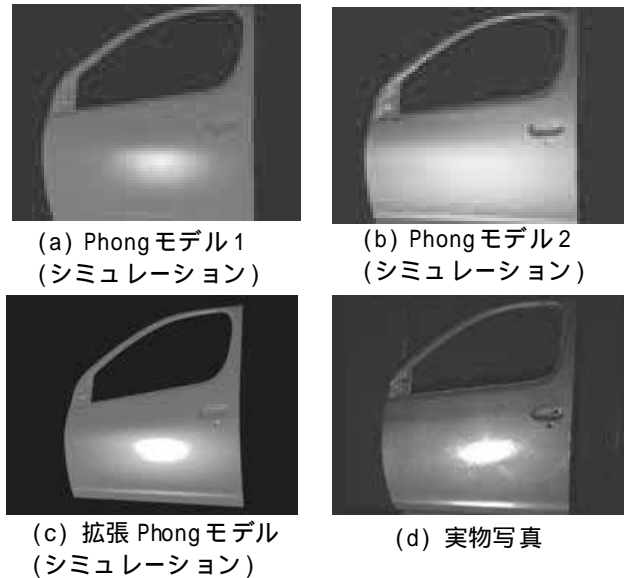


図5 自動車外板シミュレーション

### 3.3 三次元形状計測実験

#### 3.3.1 露出合成

図6はカメラの露出時間を変更して、アルミ圧延板の三次元計測を行ったときの、実物写真、空間コード画像、

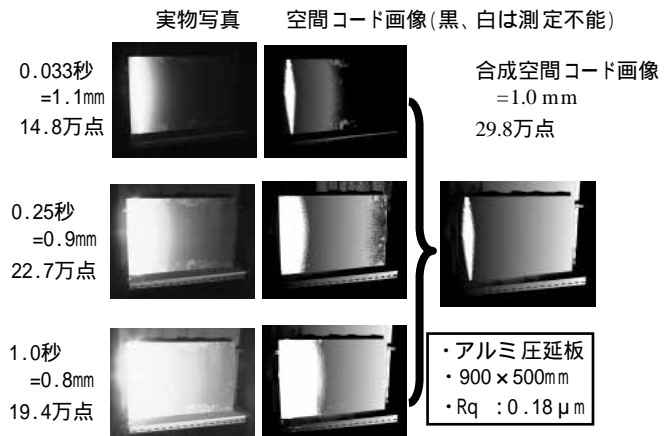


図6 露出合成による空間コード画像の生

合成した空間コード画像を示している。ただし、空間コード画像の図では、グレー階調の色は測定空間コード値、黒色は暗くて測定不能な領域、白色は明るくて測定不能な領域を示している。

例えば、露出時間=1.0秒では、露出が大きすぎて左側部分の計測ができていないが、他の露出時間では計測不能な右側の暗い部分が計測できていることが分かる。左側の一部がどの露出時間でも明るすぎて計測できていないが、合成すると大部分の領域が計測できている。ただし、露出時間を変更しても、正反射光に近い領域や、正反射光の角度から遠くて暗い領域はノイズが大きく、精度よく測定できないことが確認された。平面度は、各露出で0.8~1.1mmRMS、合成して1.0mmRMSであった。

### 3.3.2 複数観測点データ合成

図7は2つのカメラ位置から三次元計測を行い、合成した図を示している。拡散光用の1つの主カメラでは測定できなかった左側の領域も、他の配置位置からの補助カメラのデータを合成することにより、全体の計測が可能となった。合成したものの平面度は0.7mmRMSであった。

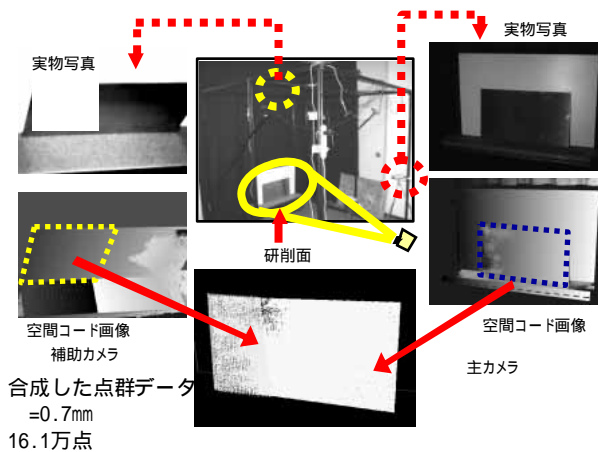


図7 複数観測点計測

### 3.3.3 曲面形状物体の測定

550×300×82mmの金属光沢質(表面粗さ0.13μmRq)の曲面の鏡面に近い金型形状の計測実験を行った(図8)。シミュレーションにより4台のカメラが必要と分かり、4台のカメラを配置した。露出合成と複数観測点データ合成を行い、金属光沢面を三次元計測した結果、全体の98%の領域を計測できた。残り2%は、露出合成と観測点合成を行っても明るすぎて計測不能な領域である。

また、当所にある三次元デジタイザ(GOM社製 ATOS、精度±0.036mm)により白色粉末を塗布した状態で測定したデータとの比較を行ったところ、測定誤差は0.6mmRMSであった。

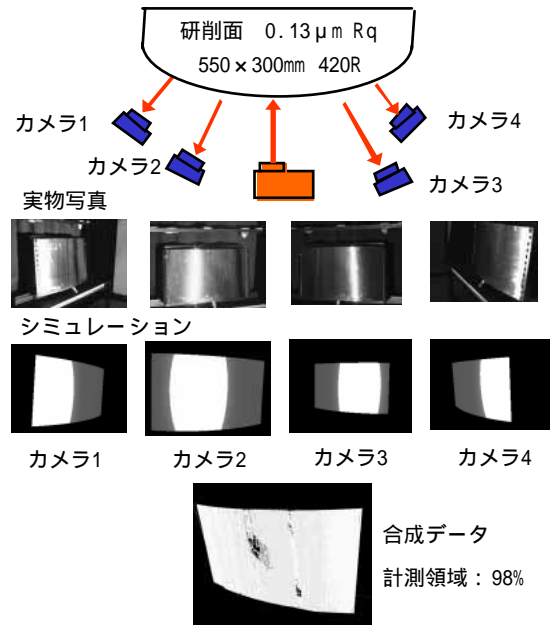


図8 曲面の計測

## 4. 結び

露出合成と複数観測点データ合成により、金属光沢面を三次元計測するシステムを試作し、基本機能を確認したところ、測定精度は1mmRMSであり、粗さ0.13μmRqの金型曲面を計測することができた。また、金属面の独自光学反射モデルを提案し、反射光のコンピュータ・シミュレーションを実現した。

今回は一般的なレイトレーシングプログラムを用いたため、カメラの位置を決めてからシミュレーションし、計測領域が全面となることを確認する方法をとったが、計測領域が全面となるように最適なカメラ配置を自動で計算することは今後の課題である。

なお、本研究はシーズ育成試験研究「正反射光を用いた非接触方式によるオンマシン金型形状計測システムの開発」により行ったものである。

## 文献

- 1)井口征士,佐藤宏介:三次元画像計測,(1990),昭晃堂
- 2)黒田,三池:信学技報,IE96-69,15(1996)
- 3)青野雅樹:Javaで学ぶ コンピュータグラフィックス,P130(2002),オーム社
- 4)依田,山本:愛知県産業技術研究所報告,4,18(2005)
- 5)荒谷真二:明解3次元コンピュータグラフィックス,P98(2003),共立出版
- 6)徐剛:写真から作る3次元コンピュータグラフィックス,P96(2001),近代科学社
- 7)S.K.Nayer, K.Ikeuchi, T.Kanade:IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 13(7), 611(1991)